

УДК 681.586

**Ю. О. СМОЛІН****УНІВЕРСАЛЬНИЙ ДАТЧИК ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ**

Розглянуто вимоги до сучасних датчиків частоти обертання. Виділено діапазон частоти обертання різних вузлів електромеханічних систем. Виділено, що однією з найважливіших вимог до датчиків частоти обертання, що використовуються у складі комп'ютерних контрольно-діагностичних систем, є їх універсальність. Наведено структурну схему розробленого датчика. Описано метод вимірювання швидкості обертання та конструкція датчика. При підготовці експеримента визначені: факторні рівні; взаємозв'язок факторів; фактор основної групи і фактор підгрупи; інтервали між вимірюваннями. Проведено рандомізацію значення аргументів багатфакторного експерименту. Складено план-матрицю проведення експеримента. Наведено структурну схему експериментальної установки. Обрані засоби контролю і вимірювання. Отримані експериментальні залежності максимальної відстані включення датчика від товщини сигнальної пластини для різних матеріалів цієї пластини.

**Ключові слова:** датчик частоти обертання, первинний перетворювач, сигнальна пластина, план-матриця експеримента, експериментальна установка, відстань включення датчика.

**Ю. А. СМОЛИН****УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ДАТЧИК ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ**

Рассмотрены требования к современным датчикам частоты вращения. Выделен диапазон частоты вращения различных узлов электромеханических систем. Отмечено, что одним из самых важных требований к датчикам частоты вращения, используемых в составе компьютерных контрольно-диагностических систем, является их универсальность. Приведена структурная схема разработанного датчика. Описан метод измерения скорости вращения и конструкция датчика. При подготовке эксперимента определены: факторные уровни; взаимосвязь факторов; фактор основной группы и фактор подгруппы; интервалы между измерениями. Проведена рандомизация значения аргументов многофакторного эксперимента. Составлена план-матрица проведения эксперимента. Приведена структурная схема экспериментальной установки. Выбраны средства контроля и измерения. Получены экспериментальные зависимости максимального расстояния включения датчика от толщины сигнальной пластины для различных материалов этой пластины.

**Ключевые слова:** датчик частоты вращения, первичный преобразователь, сигнальная пластина, план-матрица эксперимента, экспериментальная установка, расстояние включения датчика.

**Yu. O. SMOLIN****UNIVERSAL RPM SENSOR**

The requirements for modern speed sensors are considered. The range of rotational speed of various nodes of electromechanical systems is highlighted. The parameters of the speed sensors are determined, which are most often investigated and the main stages of the multi-stage process of studying these parameters are considered. It is noted that one of the most important requirements for speed sensors used in computer control and diagnostic systems is their versatility. The block diagram of the developed sensor is given. The method of measuring the speed of rotation and the design of the sensor are described. In this case, the main attention is paid to the analog part of the sensor, i.e., to a measuring transducer containing three nodes: a primary inductive transducer, an oscillation generator, and an amplifier. Timing diagrams explaining the principle of operation of the inductive measuring transducer and all the parameters of this transducer are given. When preparing the experiment, the following were determined: factor level; correlation of factors; main group factor and subgroup factor; intervals between measurements. The randomization of the value of the arguments of a multivariate experiment was carried out. An experimental matrix has been compiled. The block diagram of the experimental setup is given. Selected controls and measurements. Experimental dependences of the maximum distance of the sensor on the thickness of the signal plate for various materials of this plate are obtained.

**Keywords:** speed sensor, primary converter, signal plate, expert matrix, experimental setup, sensor switching distance.

**Вступ.** Сучасні засоби вимірювань застосовуються у всіх, без винятку, галузях науки і техніки, в тому числі й в комп'ютерних та радіоелектронних системах контролю та діагностики. Застосування таких систем стало своєрідним індикатором і гарантом якості і надійності при створенні та експлуатації нової техніки.

Серед найбільш важливих параметрів, які необхідно визначити в процесі експлуатації електромеханічних пристроїв і систем, є кутова швидкість переміщення або, іншими словами, частота обертання. Сучасні цифрові датчики частоти обертання, що надходять до складу комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики піддаються різним випробуванням, основною метою яких є забезпечення високої якості датчиків при випуску їх з виробництва та достовірності результатів вимірювань, що виконуються з допомогою цих пристроїв споживачем [1]. Такий цифровий датчик

частоти обертання було розроблено на кафедрі КРСКД НТУ «ХП».

**Постановка проблеми.** Діапазон частоти обертання обертових деталей і вузлів різних механізмів досить широкий – від десятків часток до декількох десятків тисяч обертів на хвилину. Для вимірювання частоти обертання таких діапазонів застосовується велика кількість різних датчиків, які використовують різні методи вимірювання. Залежно від вузла і його призначення, до датчиків пред'являються неоднакові вимоги. В одних випадках від датчиків потрібна підвищена точність, в інших – головне цифровий вихід, в третіх, – здатність витримувати вібро-, термо-перевантаження та ін. [1, 2].

Експериментальні дослідження датчиків найчастіше зводяться до визначення дійсних значень чутливості, похибок та інших метрологічних характеристик [3, 4]. Процес цей багатоетапний і включає декілька основних стадій: формується мета

дослідження; визначаються величини – чинники, що впливають на властивості об'єкта та їхній вигляд взаємозв'язку; будується план експерименту. Важливим моментом є також питання вибору технічних засобів, особливо вимірювальних, та узгодження їх.

Однією з найважливіших вимог до датчиків частоти обертання, що використовуються у складі комп'ютерних контрольно–діагностичних систем, є їх універсальність, тобто спроможність спрацьовувати в різних умовах, на різній відстані від об'єкта вимірювання та незалежно від матеріалу з якого виготовлено цей об'єкт.

**Мета роботи.** Експериментальним шляхом визначити відстань включення датчика частоти обертання в залежності від товщини сигнальної пластини і її матеріалу та оцінити спроможність використання датчика в комп'ютерних системах контролю та діагностики різного призначення.

**Основна частина.** Досліджуваний датчик є датчиком індуктивного типу і використовує частотний метод вимірювання швидкості обертання, при якому вимірювальний перетворювач перетворює швидкість обертання в частоту електричних імпульсів. Частотний метод вимірювання швидкості обертання признаний найбільш точним і досконалим [1, 2].

Індуктивний датчик виконаний в односторонньому «торчковому» вигляді, коли робоча зона знаходиться перед торчком датчика.

Відстань спрацьовування такого датчика залежить не тільки від відстані між датчиком і сигнальною пластиною, але і від розмірів самої пластини, і матеріалу, з якого зроблена сама сигнальна пластина.

Пропонуємий цифровий датчик частоти обертання, як конструктивно, так і схемотехнічно складається з двох частин.

Перша частина – аналогова, представляє собою вимірювальний перетворювач, призначений для перетворення механічної величини кутового переміщення в електричну величину – імпульси струму. Ця частина встановлюється в безпосередній близькості від обертового вала.

Друга частина – цифрова, являє собою ряд дискретних елементів, об'єднаних у кілька вузлів, призначених для організації підрахунку імпульсів, що відповідають кількості оборотів обертового механізму за певний проміжок часу. Ця частина конструктивно виконана окремо від аналогової і винесена за межі досліджуваного об'єкта.

Аналогова частина, тобто вимірювальний перетворювач, містить три вузла: первинний індуктивний перетворювач, генератор коливань та підсилювач.

У такому вимірювальному перетворювачі сигнальна металева пластина, що виконує роль якоря і жорстко пов'язана з валом, переміщується відносно осердя і розташованої на ньому обмотки. Ця обмотка вмикається в ланцюг генератора і зміна параметрів обмотки викликає зміну режиму роботи генератора, тобто перехід від режиму генератора до зриву генерації. Вихідний сигнал генератора коливань нормується за допомогою підсилювача. Таким чином, на виході вимірювального перетворювача формується один імпульс за один оберт валу.

Далі ці імпульси надходять в цифрову частину датчика, де відбувається підрахунок числа імпульсів і індикація отриманого результату.

Структурна схема цього датчика наведена на рис. 1.

Первинний перетворювач індуктивного типу являє собою індуктивність, виконану на основі феритової чашки типу на якій намотана мідним дротом котушка. Його параметри наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри індуктивного первинного перетворювача

Параметр або вузол	Кількісне або якісне значення
Кількість конструктивних часток	2
Мінімальні розміри сигнальної пластини від котрої повинен спрацьовувати вимірювальний перетворювач, мм	
Матеріал пластини	9x15x0,5
Феритова чашка індуктивного перетворювача	Сталь, алюміній, латунь
Зовнішній діаметр чашки, мм	Тип Б9
Внутрішній діаметр чашки, мм	8
Висота чашки, мм	2
Кількість витків котушки	4
Діаметр проводу котушки, мм	380
Напруга живлення, В	0,08
Максимальний струм споживання, не більш мА	+5
Габаритні розміри вимірюючого перетворювача:	10
- довжина, мм	40
- ширина, мм	15
- висота, мм.	15

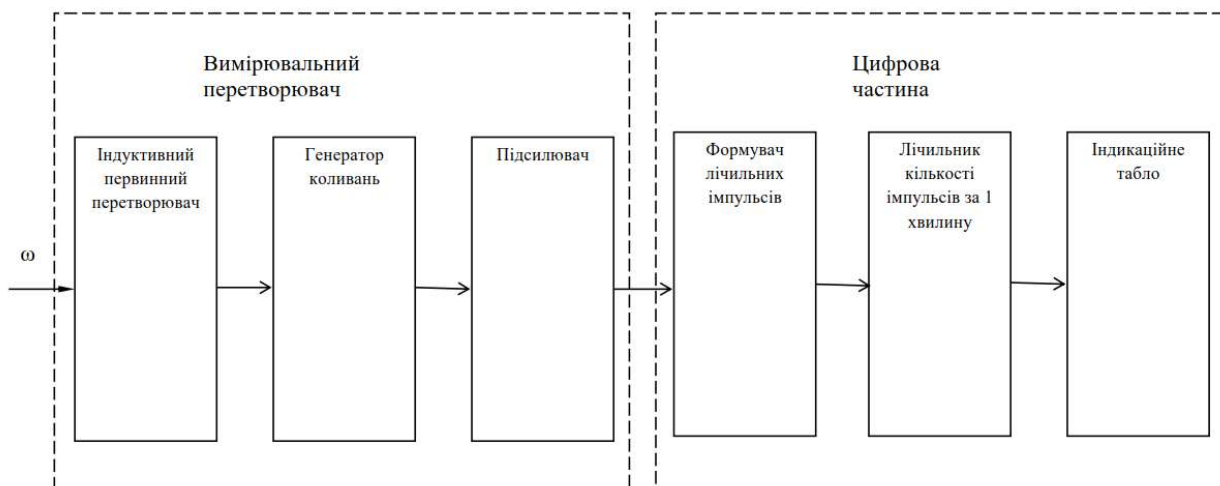


Рис. 1 – Структурна схема датчика частоти обертання

Генератор синусоїдальних коливань реалізовано на коливальному LC контурі з транзисторним зворотним зв'язком для підтримки коливань у контурі. Генератор також має термостабілізацію для стійкої роботи генератора в широкому діапазоні температур.

При проходженні сигнальної пластини рядом з торчком датчика відбувається стійкий зрив генерації

коливань генератора. Схема підсилювача постійного струму працює в ключовому режимі, що забезпечує формування прямокутного вихідного імпульсу.

Суть роботи такого перетворювача відображає часова діаграма приведена на рис. 2.

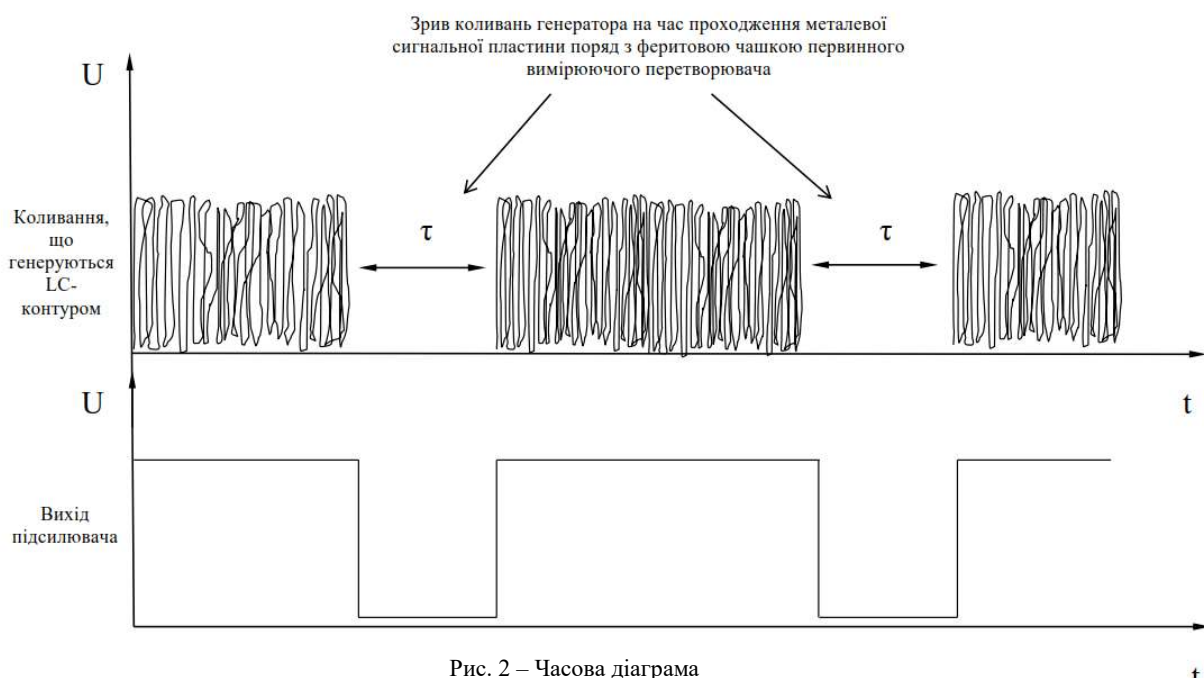


Рис. 2 – Часова діаграма

Оскільки відстань включення датчика залежить від декількох величин, таких як товщина сигнальної пластини і її матеріал, то експеримент по визначенню відстані включення датчика кваліфікується як багатофакторний. В цьому разі при проведенні експериментальних досліджень необхідно [5,6]:

- визначити факторні рівні;
- визначити взаємозв'язок факторів і провести їх класифікацію, встановивши фактор основної групи і фактор підгрупи;
- визначити інтервал між експериментами вимірюваннями;

г) вибрати тип активного експерименту та відповідний йому метод складання план-матриці експерименту;

д) провести рандомізацію значення аргументів багатофакторного експерименту;

е) скласти план-матрицю проведення експерименту;

ж) за складеною план-матрицею на виготовлений експериментальній установці та обраному обладнанні провести експериментальні дослідження.

Основною метою експериментальних досліджень було визначення залежності відстані включення X (тобто відстані від торцевої поверхні датчика до

сигнальної пластини, при якому починає відбуватися зрив генерації в первинному вимірювальному перетворювачі і на його виході з'являється імпульс) від товщини сигнальної пластини  $h$  і матеріалу з якого вона виготовлена  $M$ . Таким чином, величина  $X$  є функцією двох змінних  $X = f(h, M)$ . Отже, відстань включення буде залежати від двох груп даних і експеримент з визначення відстані включення є двофакторним.

При визначенні рівнів факторів і їх класифікації у нашому випадку виходили з того, що:

– по-перше, задані різні матеріали сигнальної пластини і саме для кожного з них слід визначити

відстань включення датчика. Отже, фактором основної групи було визначено матеріал пластини  $M$ , а фактором підгрупи товщина пластини  $h$ ;

– по-друге, ці фактори впорядковані за ієрархією (є фактори основної групи і підгрупи), отже, взаємозв'язок факторів буде ієрархічним.

Таким чином, на верхньому рівні основний фактор «матеріал» буде мати три групи – сталь, латунь, алюміній, які пов'язані з факторами підгрупи – товщиною пластини. Таку схему двофакторної ієрархічної класифікації можна представити у вигляді показаному на рис. 3.

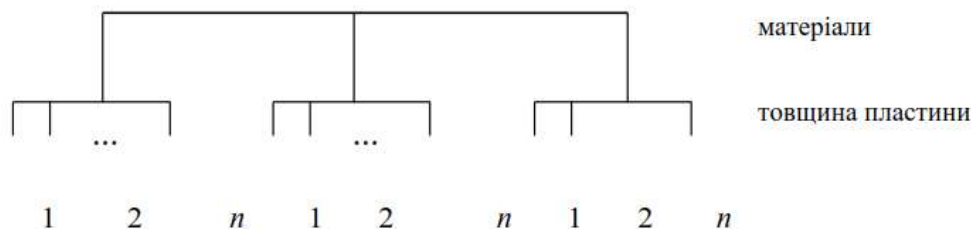


Рис. 3 – Двофакторна ієрархічна класифікація

У реальних вузлах і механізмах, де необхідно виміряти частоту обертання зазвичай товщина сигнальних (маркерних) пластин для індуктивних датчиків не перевищує  $3 \div 5$  мм. Зазвичай мінімальна товщини пластини складає 0,5 мм [2,3]. Тому для проведення експериментальних досліджень застосовували максимальну товщину пластини відповідну 3 мм.

Для ідеального вибору інтервалів між вимірами, з метою отримання експериментальної характеристики з максимальною точністю необхідно заздалегідь знати закон зміни цієї характеристики. Судячи з літературних даних [3,7,8] це залежності або близькі до лінійних, або наближаються до пологих парабол.

В цьому випадку можна керуватися загальноприйнятим правилом [3,7,9], суть якого полягає в тому, що для отримання експериментальної залежності близької до лінійної досить проводити вимірювання з кроком на порядок нижче, ніж верхня межа вимірюваної величини.

Враховуючи, що ми взяли максимальну товщину пластини 3 мм, інтервал між вимірами не повинен перевищувати 0,3 мм.

Згідно вищевикладеному було прийнято:

а) інтервал між експериментальними вимірами постійним;

б) величина інтервалу вимірювання товщини пластини  $\Delta h = 0,25$  мм.

Оскільки в кожному вимірі необхідно змінювати один чинник – товщину сигнальної пластини для кожного з пропонувананих матеріалів пластини (сталь, латунь і алюміній) було застосовано план класичного експерименту. У цьому випадку, план-матриця

проведення експерименту у загальному випадку буде мати вигляд показаний у табл. 2..

Таблиця 2 – Принцип складання план-матриці проведення експерименту

Матеріал пластини (М)	Товщина пластини (h)			
Сталь	$h_1$	$h_2$	....	$h_i$
Латунь	$h_1$	$h_2$	....	$h_i$
Алюміній	$h_1$	$h_2$	....	$h_i$

Така план-матриця встановлює умову проведення дослідів (зі сталлю, латунню або алюмінієвою пластини) і кількість дослідів у кожному випадку (від 1 до  $i$ ).

Однак якщо проводити виміри в тому послідовному порядку, в якому йдуть рядки матриці наведеною на рисунку 4, то в цьому випадку може виникати систематична похибка. З цього випливає, що збільшувати товщину пластини слід у випадковому порядку, тобто необхідно рандомізувати проведення вимірів.

Рандомізацію було проведено найбільш поширеним методом генерації псевдовипадкових чисел [4, 5, 6].

Сигнальні пластини обирались з різних матеріалів: сталь, латунь і алюміній (сталь 3413; сталь 20Х13; сталь 10КП; латунь Л63; сплав Д16). Для кожного матеріалу було проведено рандомізацію. В результаті була отримана рандомізована план-матриця проведення двофакторного класичного експерименту по дослідженню відстані включення датчика частоти обертання наведена в табл. 3.

Таблиця 3 – Рандомізована план-матриця проведення двофакторного класичного експерименту по дослідженню відстані включення датчика частоти обертання

Основні фактори, м (матеріали з яких виготовлено пластину)	Фактори підгруп, h (товщина сигнальної пластини, мм)										
Сталь 3413	1,25	1,75	0,50	2,50	2,25	1,00	2,00	2,75	0,75	3,00	1,50
Сталь 20Х13	1,00	1,75	0,75	2,25	2,00	0,50	1,50	3,00	2,50	2,75	1,25
Сталь 10КП	0,75	1,25	2,00	2,50	1,50	2,25	0,50	1,00	1,75	3,00	2,75
Латунь Л63	2,75	0,50	3,00	1,00	0,75	1,25	2,50	2,00	2,25	1,50	1,75
Сплав Д16	1,50	3,00	1,00	0,50	2,50	2,75	2,25	0,75	1,25	1,75	2,00

Для проведення експериментальних досліджень була створена експериментальна установка, схема якої приведена на рис. 4.

Вона включає в себе два нестандартних пристрої:

1) пристрій кріплення датчика з вузлом жорсткого фіксування перетворювача, що представляє собою станину з штативом, в якому за допомогою гвинтових затисків вимірювальний перетворювач жорстко зафіксований у просторі за двома координатами співвісно з валом електроприводу сигнальної пластини

та спеціальним регулювальним гвинтом, який, в свою чергу, забезпечує переміщення датчика в просторі по третій координаті і дозволяє вимірювати відстань між торчком вимірювального перетворювача датчика і сигнальною пластиною;

2) пристрій переміщення сигнальної пластини з електричним двигуном, на валу якого встановлено текстолітовий диск і на якому, в свою чергу, жорстко закріплена сигнальна пластина з набору знімних сигнальних пластин, які кріпляться до диску.

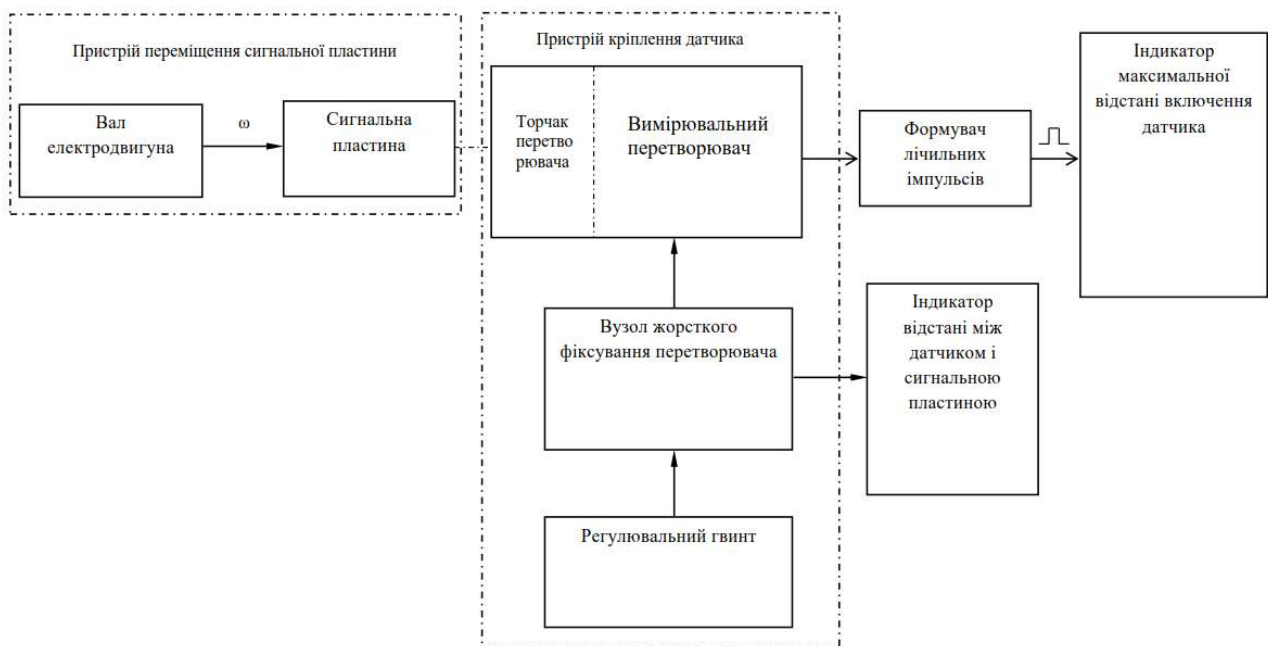


Рис. 4 – Структурна схема експериментальної установки

В якості електродвигуна застосовувався електродвигун постійного струму ДПР-7 з таходатчиком і регулятором швидкості.

В якості індикатора відстані між датчиком і сигнальною пластиною застосовувався багатооборотний механічний індикатор типу 5МІГ.

В якості індикатора максимальної відстані спрацювання датчика використовувався універсальний осцилограф С1-108, призначений для визначення періодичних і одиночних імпульсів.

Момент включення перетворювача визначався по появі імпульсу на екрані осцилографа.

Розміри сигнальної пластини: ширина 10 мм, довжина 15 мм.

Експеримент проводився за складеною план-матрицею.

Виміри проводилися при частоті обертання валу і, отже, сигнальної пластини починаючи з  $\omega = 10$  об / хв. При такій невисокій частоті обертання чутливість вимірювального перетворювача близька до мінімальної. У техніці такі частоти доводиться вимірювати досить рідко. Зазвичай вони становлять тисячі об / хв. З підвищенням частоти, чутливість вимірювального перетворювача буде суттєво зростати.

Результати експерименту із сигнальною пластиною шириною 10 мм і довжиною 15 мм наведені на рис. 5.

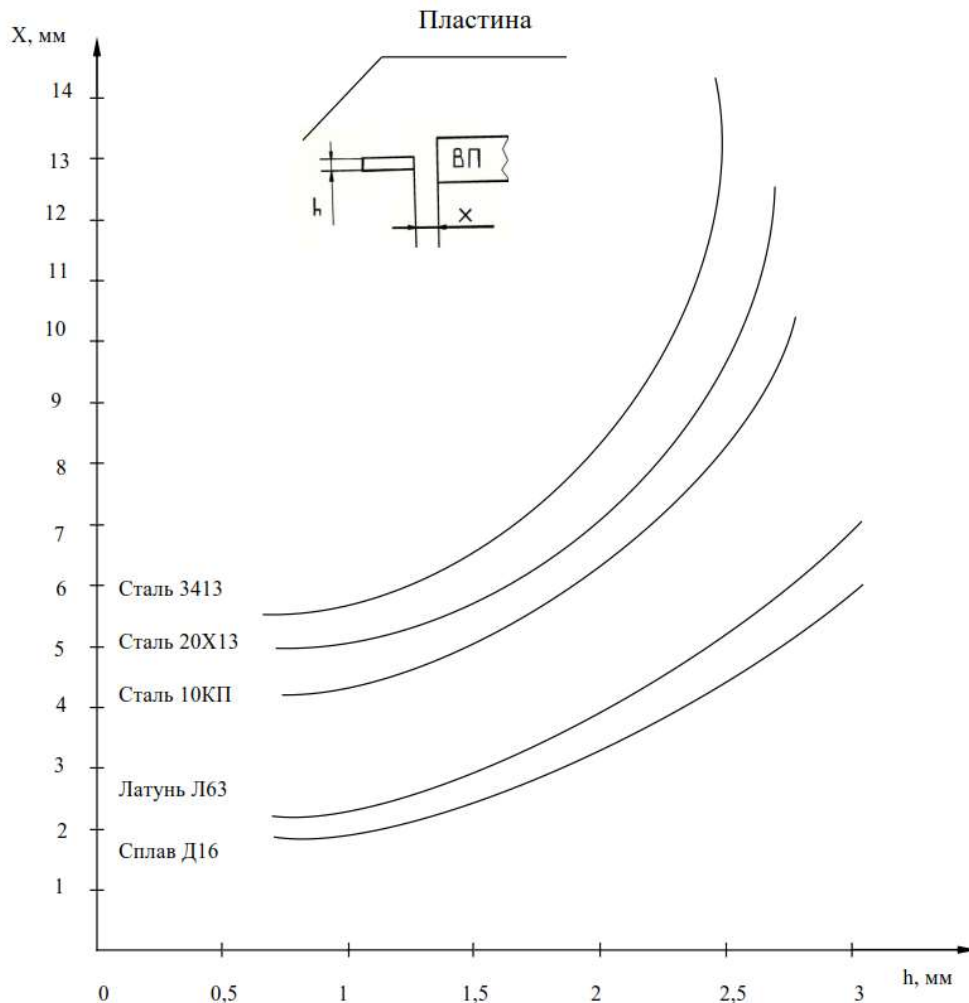


Рис. 5 – Експериментальна залежність максимальної відстані включення датчика від товщини сигнальної пластини для різного матеріалу пластини

З наведених графіків видно, що при застосуванні сигнальних пластин зі сталі, з мінімальною товщиною 0,5 мм, вимірювальний перетворювач надійно спрацює на відстані між сигнальною пластинкою і перетворювачем до 4 мм, а з пластинами зі латуні та алюмінію до 2 мм.

У реальних умовах, товщина пластини зазвичай складає не менш 2 ÷ 2,5 мм, що дозволяє збільшити відстань до 8 ÷ 10 мм, при використанні сталевих сигнальних пластин, і до 4 мм, при використанні латунних та алюмінієвих. Також у реальних умовах частота обертання, що вимірюється, зазвичай складає сотні та тисячі об / хв. Слід ще раз підкреслити, що з підвищенням частоти обертання чутливість вимірювального перетворювача буде суттєво зростати і відстань спрацювання буде також зростати.

#### Висновки.

1. Складена план-матриця експерименту забезпечила підвищення точності й достовірності отриманих експериментальних даних за рахунок усунення можливості виникнення систематичної похибки та обраному інтервалу вимірювань.

2. Розроблена і створена установка для проведення досліджень забезпечила проведення експерименту за запропонованою план– матрицею.

3. Отримані експериментальні дані показали високу чутливість датчика, високу надійність його спрацювання у широкому діапазоні відстані між датчиком і сигнальною пластинкою при різних матеріалах сигнальної пластини, чим підтвердили його універсальність, тобто спроможність використання датчика в комп'ютерних системах контролю та діагностики різного призначення

#### Список літератури

1. Диагностика машин автоматом и промышленных роботов. / под ред. В. П. Нахпетова. – М.: 1991. – 175 с.
2. Технические средства диагностики. Справочник: / под ред. В.В. Клоева. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
3. Бридли К. Измерительные преобразователи. Справочное пособие. : Пер. с англ. / К. Бридли – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
4. Кузьмичев Д.А. Автоматизация экспериментальных исследований. / Д.А. Кузьмичев, И.А. Радкевич, А.Д. Смирнов – М.: Высш.шк., 1987. – 407 с.
5. Володарский Е.Т. и др. Планирование и организация измерительного эксперимента. / Е.Т. Володарский, Б.М. Малиновский, Ю.М. Туз – М.: Высш. Шк., 1987. – 280 с.
6. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. Пер. с англ. / Н. Джонсон, Ф.Лион. – М.: Мир, 1991. – 520 с.

7. Евтихеев Н.Н. Измерения электрических и неэлектрических величин / Н.Н. Евтихеев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугоров // – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
8. Безвесильная А.Н. Таланчук П.Н. Преобразующие устройства приборов / Е. Н. Безвесильная, П. М. Таланчук // – К.: УМК ВО., 1993. – 552 с.
9. Вострокутов М.М. Цифровые измерительные устройства, теория погрешностей, испытания, поверка / М.М. Вострокутов // – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 208 с.
5. Volodarskiy E.T. i dr. Planirovanie i organizatsiya izmeritelnogo eksperimenta. / E.T. Volodarskiy, B.M. Malinovskiy, Yu.M. Tuz – Moscow : Vyssh. Shk ., 1987. – 280 p.
6. Dzhonson N. Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke: Metodyi planirovaniya eksperimenta. Per. s angl. / N. Dzhonson, F. Lion – Moscow : Mir, 1991.-520 s.
7. Evtihev N.N. Izmereniya elektricheskikh i neelektricheskikh velichin / N.N. Evtihev, Ya.A. Kupersmidt, V.F. Papulovskiy, V.N. Skugorov. – Moscow: Energoatomizdat, 1990. – 352 p.
8. Bezvesilnaya A.N. Talanchuk P.N. Preobrazuyushchie ustroystva priborov / E. N. Bezvesilnaya, P. M. Talanchuk.– Kiev.: UMC VO., 1993. – 552 p.
10. Vostrokutov M.M. Tsifrovyye izmeritelnyye ustroystva, teoriya pogreshnostey, ispytaniya, poverka / M.M. Vostrokutov – Moscow.: Energoatomizdat, 1990

#### References (transliterated)

1. Diagnostika mashin avtomatov i promyshlennykh robotov. / pod red .. V. P. Nahapetova. – Moscow : 1991. – 175 p.
2. Tekhnicheskie sredstva diagnostiki. Spravochnik: / Pod red .. V.V. Klyueva. – Moscow : Mashinostroenie, 1989. – 672 p.
3. Bridli K. Izmeritelnyye preobrazovateli. Spravochnoe posobie.: per. s angl. – Kiev : Bridli – M.: Energoatomizdat, 1991. – 144 p.
4. Kuzmichev D.A. Avtomatizatsiya eksperimentalnykh issledovaniy. / D.A. Kuzmichev, I.A. Radkevich, A.D. Smirnov – Moscow : Vyssh.shk., 1987. – 407 p.

Надійшла (received) 11.10.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Смолін Юрій Олександрович (Смолін Юрій Александрович, Smolin Yuriy Aleksandrovich)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна